

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМЕХ ОТРАЖЕНИЯ В МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

К. Е. АФАНАСЬЕВ, Е. А. ВЕРШИНИН

Кемеровский государственный университет, Россия

e-mail: keafa@kemsu.ru, keen@kemsu.ru

The work is devoted to the transient analysis in cable lines. Numerical simulation of the system of the telegraph equations is carried out by using the Godunov method and the modified Runge — Kutta — Feldberg method. The results of numerical simulation for different modes of operation of the multiconductor transmission lines are presented.

Введение

Качество функционирования инфокоммуникационных систем во многом определяется наличием помех в каналах связи. Эти помехи можно разделить на два основных вида: помехи отражения и индуцированные помехи. Помехи отражения вызываются рассогласованием параметров линий связи и оконечных портов. Они представляют собой нежелательный переходный процесс в рассматриваемой электрической цепи объекта, содержащей участки с распределенными и сосредоточенными параметрами. В локальных сетях помехи отражения могут возникать при неправильном подборе коаксиальных кабелей или витых пар, соединителей, входных и выходных сопротивлений сетевых портов. При этом уровень помех, приводящих к значительным искажениям формы сигнала, бывает достаточно велик. Это может вызвать ложное срабатывание системы, а в худшем случае — выход аппаратуры из строя вследствие перегрузки входных каскадов.

Индуцированные помехи возникают из-за близкого расположения линий (информационных или энергопитания), так как за счет взаимных емкостных и индуктивных параметров линий электромагнитная энергия переносится на передающую линию. Уровень таких помех определяется заданными при конструировании параметрами электрических соединений, от которых зависят взаимные емкостные и индуктивные параметры связанных линий. Индуцированные помехи в линиях связи также ограничивают быстродействие систем и непосредственно влияют на их работоспособность. Другими словами, эти помехи могут приводить к нарушению функционирования систем.

Хорошо известно [1], что эффективный метод снижения уровня помех — это применение балансного включения линий с дополнительным экранированием. Однако реальные инфокоммуникационные системы являются многосегментными, и не везде можно добиться точного согласования компонентов сети и их эффективного экранирования. Важно учесть, что после монтажа системы эффект межкабельных наводок трудно обнаружить с помощью стандартных измерений, а использование дорогостоящего оборудования для анализа сети не всегда экономически целесообразно.

Таким образом, практическая значимость настоящей работы заключается в построении моделей и алгоритмов для решения задачи исследования переходных процессов в линиях связи, являющихся причиной искажения сигналов и увеличения перекрестных наводок на соседние проводники. Это, в свою очередь, может привести к отклонению от международных норм вторичных параметров передачи в линиях связи и ухудшению функционирования сети в целом.

Линии связи имеют широкое применение в различных отраслях техники, электроники и самих средствах связи. В самом общем случае распространение электрических сигналов в любых проводных структурах описывается уравнениями Максвелла. Однако необходимые для этого вычислительные затраты оказываются крайне высокими даже для относительно простых конфигураций. Поэтому такой анализ, называемый электродинамическим или полноволновым (поскольку он учитывает все типы волн, возникающие в многопроводных структурах), используется, как правило, только на очень высоких частотах в десятки и сотни гигагерц. При статическом подходе делается упрощающее предположение, что в линиях связи отсутствуют потери, дисперсия и высшие типы волн и в них может распространяться только основная, поперечная волна. Это сводит уравнения Максвелла к телеграфным уравнениям, решение которых гораздо проще, но весьма точно для большинства практических применений. При допущении распространения только поперечной волны получаются довольно точные результаты даже при наличии потерь в проводниках. Этот подход в литературе называется квазистатическим [2, 3]. В силу своих достоинств он широко используется для анализа самых различных конфигураций. Однако анализ исследований по многопроводным полосковым линиям передачи на монтажных платах [3] показал, что решение большинства задач, несмотря на упрощения квазистатического подхода, может оказаться весьма сложным, и только для некоторых частных случаев воздействий и конфигураций возможны точные аналитические решения.

Из публикаций последних лет можно выделить ряд исследований по разработке методов анализа отклика (переходного процесса) и вычислению параметров межсоединений самой различной сложности, проводимых в нашей стране и за рубежом [3, 4]. В результате благодаря квазистатическому подходу моделирование распространения электрических сигналов в линиях передачи делится на три задачи, решение которых можно искать независимо друг от друга различными численными и аналитическими методами [3]:

- определение матриц параметров линий связи;
- определение параметров неоднородностей;
- определение отклика на заданное воздействие.

В настоящей работе рассматривается задача определения в многопроводной линии переходного процесса, вызванного подключением незаряженной линии связи к источнику напряжения. Моделирование проведено для различных режимов работы линий с активными и комплексными нагрузками при учете взаимодействия между проводниками и без такового.

1. Математические модели

Рассмотрим линию передачи, состоящую в общей сложности из $N + 1$ проводников. Предположим, что N проводников являются сигнальными, а проводник с номером $N + 1$ представляет собой земляной (опорный) проводник. Также предположим, что земля имеет нулевой потенциал и линия по длине однородна. Пусть ось x направлена вдоль линии,

причем точка $x = 0$ соответствует положению генератора, а $x = D$ — положению нагрузки. Геометрические размеры структуры в поперечном сечении малы по сравнению с длиной волны сигнала, проходящего по ней. Длина линии намного превышает расстояние между ее проводниками. В линии отсутствуют высшие типы волн. Тогда в анализе можно использовать обобщенные телеграфные уравнения для системы из N сигнальных проводников [5]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial U_k}{\partial x} &= R_k I_k + L_k \frac{\partial I_k}{\partial t} + \sum_{i=1}^N R_{ik} I_{ik} + \sum_{i=1}^N M_{ik} \frac{\partial I_i}{\partial t}, \\ -\frac{\partial I_k}{\partial x} &= G_k U_k + C_k \frac{\partial U_k}{\partial t} + \sum_{i=1}^N G_{ik} (U_i - U_k) + \sum_{i=1}^N C_{ik} \frac{\partial U_{ik}}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где R_k, L_k, G_k, C_k — собственные параметры (сопротивление, индуктивность, проводимость изоляции и емкость единицы длины k -го проводника соответственно); $R_{ik}, M_{ik}, G_{ik}, C_{ik}$ — аналогичные взаимные параметры между i -м и k -м проводниками системы из N проводников. Первая пара слагаемых в системе (1) описывает процесс распространения электромагнитного поля, вторая — взаимодействие между проводниками.

В частотной области система (1) будет иметь вид

$$\begin{aligned} -\frac{dU_k}{dx} &= I_k Z_k + \sum_{i=1}^N I_i Z_{ik}, \\ -\frac{dI_k}{dx} &= U_k Y_k + \sum_{i=1}^N Y_{ik} (U_i - U_k), \end{aligned} \quad (2)$$

где $Z_k = R_k + j\omega L_k$ — полное сопротивление k -го провода; $Y_k = G_k + j\omega C_k$ — полная проводимость k -го проводника; $Z_{ik} = R_{ik} + j\omega M_{ik}$ — полное сопротивление между i -м и k -м проводами; $Y_{ik} = G_{ik} + j\omega C_{ik}$ — полная проводимость между i -м и k -м проводами.

Для численного решения систем (1) и (2) рассматриваются два метода:

— в частотной области — модифицированный метод Рунге — Кутты — Фельдберга для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений в комплексных переменных;

— в физической области — метод Годунова, хорошо зарекомендовавший себя в задачах газовой динамики [6].

Эти методы позволяют проводить анализ в частотной и временной областях, но имеют свои достоинства и недостатки. В частотной области удобно анализировать распространение выделенной части спектра сигнала в многопроводных линиях с потерями и без них. Использование алгоритма быстрого преобразования Фурье дает возможность рассматривать переходный процесс при рассогласовании линии с нагрузкой. К недостаткам можно отнести трудоемкость анализа неоднородностей в линиях и конечных портах. Напротив, во временной области такого рода трудностей не существует, однако возникает проблема учета потерь в линиях и сильно возрастает время счета при увеличении числа анализируемых проводников.

2. Постановка задачи в частотной области

Рассмотрим метод Рунге — Кутты — Фельдберга. Преобразуем систему телеграфных уравнений в частных производных (1) к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (2). Выполним численное решение системы (2) методом Рунге — Кутты — Фельдберга [7], реализованным для работы с комплексными числами. Используя дискретное преобразование Фурье, переходим во временную область. Такой подход позволяет анализировать токи и напряжения в линиях как в частотной, так и во временной области.

Рассмотрим распространение одной гармоники сигнала в двухпроводной линии без потерь, замкнутой на активное сопротивление, тогда система уравнений (2) будет иметь вид

$$\begin{aligned} -\frac{dU}{dx} &= (R + jwL)I, \\ -\frac{dI}{dx} &= (G + jwC)U. \end{aligned} \quad (3)$$

Граничные условия для амплитуд падающих и отраженных волн на нагрузке U_n и генераторе U_g в зависимости от коэффициентов отражения будут иметь вид [8]

$$U_n(p) = \begin{cases} 0, \\ E(1 + mu_R), \\ E(1 + mu_R) \left[1 + \sum_{k=1}^m (\mu_g \mu_R)^k \right], \end{cases} \quad U_g(p) = \begin{cases} E, \\ E \left[1 + \left(1 + \frac{1}{\mu_g} \right) \sum_{k=1}^m (\mu_g \mu_R)^k \right], \end{cases} \quad (4)$$

где $\mu_g = (Z_g - Z_B)/(Z_g + Z_B)$ — коэффициент отражения генератора по напряжению; $\mu_n = (Z_n - Z_B)/(Z_n + Z_B)$ — коэффициент отражения нагрузки по напряжению; $u(0, p) = E$ — амплитуда сигнала в фазовой плоскости.

Аналогично для тока:

$$I_n(p) = \begin{cases} 0, \\ E(1 + nu_R), \\ E(1 + nu_R) \left[1 + \sum_{k=1}^m (\nu_g \nu_R)^k \right], \end{cases} \quad U_g(p) = \begin{cases} E, \\ E \left[1 + \left(1 + \frac{1}{\mu_g} \right) \sum_{k=1}^m (\nu_g \nu_R)^k \right], \end{cases} \quad (5)$$

где $\nu_g = (Z_B - Z_g)/(Z_B + Z_g)$ — коэффициент отражения генератора по току; $\nu_n = (Z_B - Z_n)/(Z_B + Z_n)$ — коэффициент отражения нагрузки по току; I_n, I_g — амплитуды падающих и отраженных волн тока на нагрузке линии и генераторе сигнала соответственно.

Характеристики линии запишем в общем виде, что позволит нам рассматривать любую проводную структуру:

$$\gamma = \sqrt{(R + jwL)(G + jwC)}, \quad Z_B = \sqrt{(R + jwL)/(G + jwC)}.$$

3. Постановка задачи в физической области

Рассмотрим метод Годунова. Преобразуем систему телеграфных уравнений (1) к каноническому виду с диагональной матрицей M :

$$\frac{\partial \nu}{\partial t} + M \frac{\partial \nu}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

Строим разностную схему по методу Годунова [6] для численного решения системы (6).

В основе метода лежит идея использования точных решений уравнений с кусочно-постоянными начальными данными для построения разностной схемы (метод распада разрыва). Проанализируем распространение одной гармоники сигнала в двухпроводной линии без потерь, замкнутой на активное сопротивление, тогда система уравнений (1) примет вид

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t}, \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (7)$$

Рассмотрим систему (7) с начальными условиями:

$$\begin{aligned} u_0(x) = u_1, i_0(x) = i_1 & \quad \text{при } x < x^*, \\ u_0(x) = u_2, i_0(x) = i_2 & \quad \text{при } x > x^*, \end{aligned} \quad (8)$$

где x^* — точка разрыва начальных данных.

Не обращая внимание на разрывный характер начальных данных, построим решение системы (7), (8) методом характеристик:

$$\begin{aligned} u = u_1, i = i_1 & \quad \text{при } x < x^* - at, \\ u = u_2, i = i_2 & \quad \text{при } x > x^* - at, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} u &= \frac{u_1 + u_2}{2} - \frac{i_2 - i_1}{\sqrt{L/C}}; \\ i &= \frac{i_1 + i_2}{2} - \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{u_2 - u_1}{2} \quad \text{при } x^* - at < x < x^* + at. \end{aligned} \quad (10)$$

Построенные функции имеют разрыв вдоль двух линий: $x - at = x^*$ и $x + at = x^*$.

Разобьем область на ряд слоев по координате x узлами x_j . Предположим, что в начальный момент времени $t = 0$ внутри каждого слоя величины u и i постоянны, и их значения в слое между узлами x_{j-1} и x_j обозначим через $u_{j-1/2}$ и $i_{j-1/2}$. На границе между каждыми двумя слоями возникает распад разрыва.

При практической реализации численного метода решение на момент времени $t = \tau$ заменяется решением, имеющим такую же структуру, как и в начальный момент $t = 0$. Это решение является приближенным к истинному решению при $t = \tau$. Таким образом, в момент времени $t = \tau$ в качестве приближенного решения получаем функции, постоянные внутри интервалов, ограниченных прежними узлами сетки x_j , и устроенные так же, как и начальные данные. Функции обозначаются сверху индексом “ $j - 1/2$ ” и находятся по формулам

$$\begin{aligned} u^{j-1/2} &= u_{j-1/2} - \frac{\tau}{h} \frac{1}{C} (I_j - I_{j-1}), \\ i^{j-1/2} &= i_{j-1/2} - \frac{\tau}{h} \frac{1}{L} (U_j - U_{j-1}). \end{aligned} \quad (11)$$

Последовательно применяя формулу (11) для всех узлов разностной сетки, на момент времени $t_1 = \tau$ в качестве приближенного решения получаем кусочно-постоянные функции, которые устроены точно так же, как начальные данные. При следующем шаге по времени, используя полученные результаты как исходные, выполняем новый цикл вычислений.

Для случая многопроводной линии без потерь систему (1) можно записать в виде

$$A \frac{\partial u}{\partial t} + B \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (12)$$

где A и B — матрицы соответствующих коэффициентов. Преобразуем вектор-функции u вида $u = L\nu$ с невырожденной матрицей L для получения канонического вида системы (1) с диагональной матрицей M :

$$\frac{\partial \nu}{\partial t} + M \frac{\partial \nu}{\partial x} = 0. \quad (13)$$

Система (14) состоит из m уравнений для отдельных компонент ν^m вектор-функции ν :

$$\frac{\partial \nu^m}{\partial t} + \mu_m \frac{\partial \nu^m}{\partial x} = 0, \quad (14)$$

где $\mu_m = dx/dt$ — характеристики. Компоненты ν^m носят название римановых инвариантов и сохраняют постоянные значения вдоль μ_m . Разностная формула для системы (14) может быть представлена в виде

$$\frac{\nu^{j-1/2} - \nu_{j-1/2}}{\tau} + M \frac{V_j - V_{j-1}}{h}. \quad (15)$$

Компоненты вектора V_j определяются как

$$V_j^m = \begin{cases} \nu_{j-1/2}^m, & \text{если } \mu_m > 0, \\ \nu_{j+1/2}^m, & \text{если } \mu_m < 0. \end{cases} \quad (16)$$

В случае $\mu_m = 0$ величины V_j^m могут быть назначены произвольно, так как в (14) они будут умножены на μ_m .

Из формул (15), (16) следует, что для компоненты вектор-функции ν с номером m , который далее опустим, имеют место равенства

$$\nu^{j-1/2} = \begin{cases} \left(1 - \mu_m \frac{\tau}{h}\right) \nu_{j-1/2} + \mu_m \frac{\tau}{h} \nu_{j-3/2}, & \text{если } \mu_m > 0, \\ \left(1 + \mu_m \frac{\tau}{h}\right) \nu_{j-1/2} - \mu_m \frac{\tau}{h} \nu_{j+1/2}, & \text{если } \mu_m < 0, \\ \nu_{j-1/2}. & \end{cases} \quad (17)$$

Таким образом, получаем разностную схему для многопроводной линии связи. Граничные условия для решения задач имеют вид (4), (5) с тем лишь отличием, что E является амплитудой сигнала во временной области.

4. Тестирование численных методов

Для тестирования методов проведем расчеты двухпроводной линии (3) в нескольких режимах работы с граничными условиями (4), (5). В качестве сигнала выберем единичный скачок напряжения. Для более наглядного отображения переходного процесса примем, что активное сопротивление нагрузки отличается от вещественной составляющей волнового сопротивления линии примерно в два раза. Результаты представлены для средней точки проводника. В качестве значений первичных параметров линии примем следующие:

$L = 1 \text{ мГн}$ — индуктивность линии, $C = 10 \text{ нФ}$ — емкость линии, $G = 0$ — проводимость изоляции, $R = 0$ — активное сопротивление линии.

Результаты моделирования различных режимов работы линии без потерь представлены на рис. 1; величина активного сопротивления нагрузки меньше волнового сопротивле-

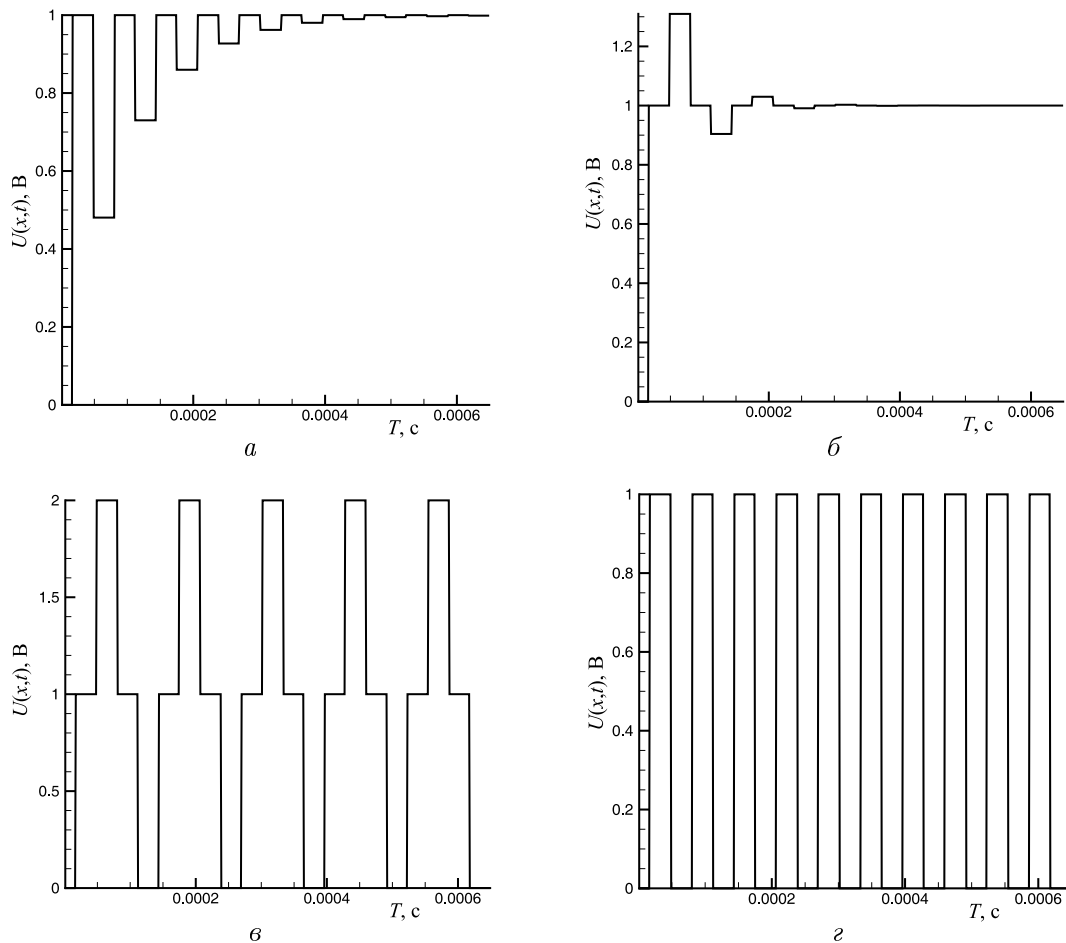


Рис. 1. Идеальная линия связи ($Z_B = 316 \text{ Ом}$): а — $R_n = 100 \text{ Ом}$; б — $R_n = 600 \text{ Ом}$; в — $R_n = 10^{10} \text{ Ом}$; г — $R_n = 0$.

Результаты анализа, выполненного методами Годунова и Рунге — Кутты — Фельдберга для двух отражений от места обрыва

Точное решение	Метод Рунге — Кутты — Фельдберга	Метод Годунова	ϵ , метод Рунге — Кутты — Фельдберга, %	ϵ , метод Годунова, %
1.0	0.999999983199996	1.0001071880618030	1.68E-007	1.07E-002
1.0	0.999999983199996	1.0001249920017030	1.68E-007	1.25E-002
1.0	0.999999983199996	1.0001249920092990	1.68E-007	1.25E-002
2.0	1.9999999823385180	2.0000000152994060	8.831E-007	7.65E-007
2.0	1.9999999823385180	2.0000000152181740	8.831E-007	7.61E-007
2.0	1.9999999823385180	2.0000000152053189	8.831E-007	7.6E-007
1.0	1.0000000031206320	0.9998928272126320	3.121E-007	1.07E-002
1.0	1.0000000031206320	0.9998750232727327	3.121E-007	1.25E-002
1.0	1.0000000031206320	0.9998750232688399	3.121E-007	1.25E-002

ния линии (рис. 1, а, $R_n = 100 \text{ Ом}$); величина активного сопротивления нагрузки больше волнового сопротивления (рис. 1, б, $R_n = 500 \text{ Ом}$); разрыв линии или режим холостого хода (рис. 1, в, $R_n = 10 \text{ Ом}$); короткое замыкание (рис. 1, г, $R_n = 0$).

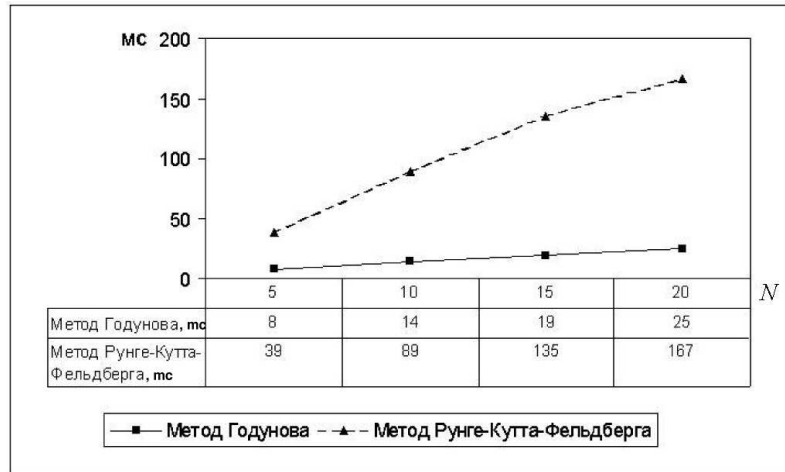


Рис. 2. Временные затраты методов при различном количестве узлов N с шагом сетки $H = 0.1$.

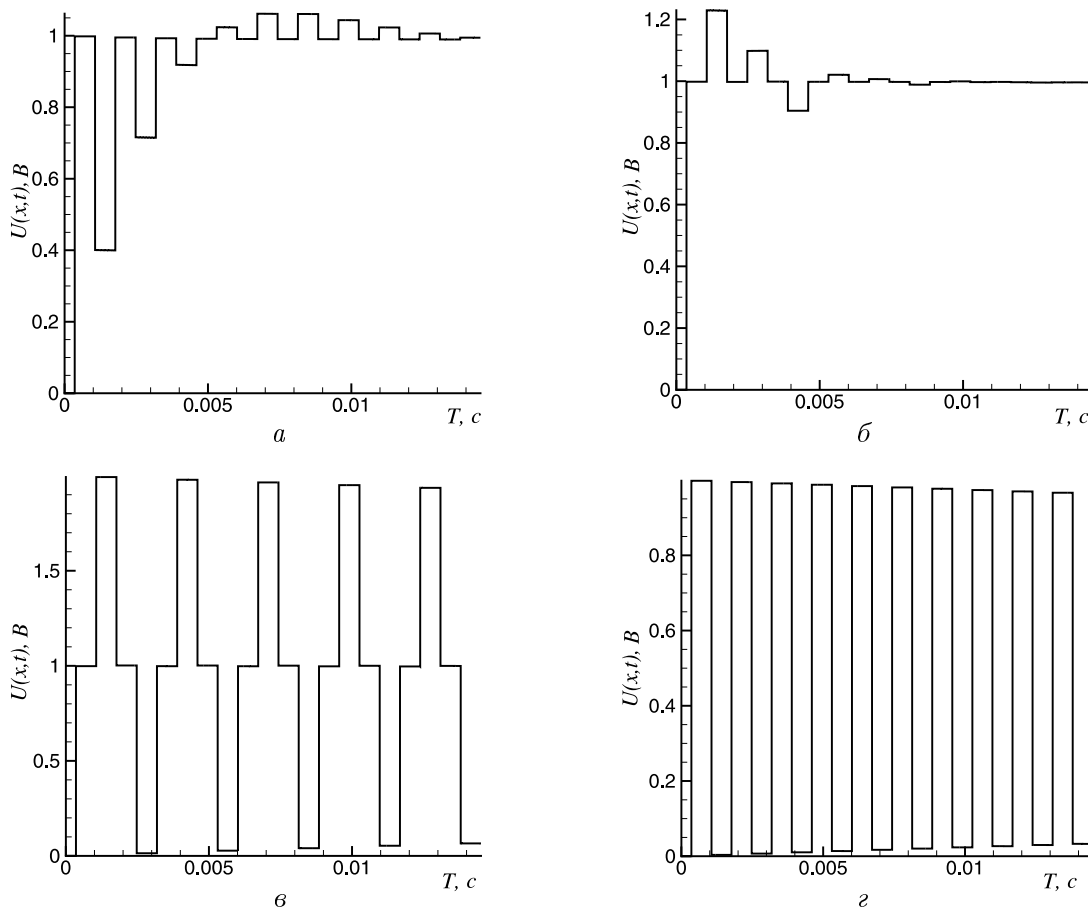


Рис. 3. Линия связи с потерями ($Z_B = 7074 - j7067 \text{ Ом}$): а — $R_n = 3 \text{ кОм}$; б — $R_n = 15 \text{ кОм}$; в — $R_n = 10^{10} \text{ Ом}$; г — $R_n = 0$.

В таблице приведены данные, характеризующие точность предложенных методов по отношению к аналитическому решению уравнений (3) в случае разрыва линии [9–11]:

$$U(x, t) = E \left[1 - \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{\cos(\beta'_k) \sin(\beta'_k) t \frac{x}{v}}{2k+1} \right) \right],$$

где $\beta'_k = ((2k+1)\pi)/(2l\sqrt{LC})$; $v = 1/\sqrt{LC}$ — скорость волны; l — длина проводника.

Сравнение ведется на верхней части профиля совокупного отклика (рис. 1, в). На каждом интервале, соответствующем уровню напряжения 1, 2 и 1 В, выбрано по три точки для сравнения. Из таблицы видно, что метод Годунова дает менее точные результаты, что объясняется численной природой метода, в то время как метод Рунге — Кутты — Фельдберга относится к “точным” и дает более верное решение, однако проигрывает в скорости вычислений (рис. 2).

На рис. 3 представлены результаты решения задач для двухпроводной линии с потерями. Активное сопротивление на единицу длины выбрано равным 50 Ом, что соответствует большинству проводных структур, использующихся в локальных сетях передачи данных.

Хорошо известно, что в линиях с потерями амплитуда любого сигнала при распространении вдоль линии связи уменьшается. Поэтому в любом режиме процесс будет стремиться к уровню источника сигнала, в отличие от идеального случая, где при холостом ходе и коротком замыкании может существовать бесконечный неустановившийся процесс. Это положение хорошо иллюстрируется рис. 1, в и г и рис. 3, в и г.

5. Многопроводная линия

Для численного решения задачи систему обыкновенных дифференциальных уравнений (2) представим в матричной форме:

$$-\frac{d}{dx} \mathbf{U} = \mathbf{Z} \mathbf{I}, \quad -\frac{d}{dx} \mathbf{I} = \mathbf{Y} \mathbf{U},$$

где Z, Y — симметричные, комплексные, квадратные матрицы размером $N \times N$; \mathbf{U}, \mathbf{I} — вектор-столбцы напряжений и токов в линиях. Тогда характеристики линии будут иметь вид

$$\gamma = \sqrt{ZY}, \quad \mathbf{Z}_B = \sqrt{ZY^{-1}}.$$

Рассмотрим пример численного моделирования двух пар кабельных линий, нагруженных на активное сопротивление. Исходная система для $i = 1, 2$ и $k = 1, 2$ имеет вид (2). Граничные условия для каждой линии аналогичны (4) и (5). Соотношение волнового сопротивления и нагрузки $Z_n/\text{Re}(Z_B) = 1.15$ на всех частотах. В действительности эти соотношения будут разными для каждой частоты, но для демонстрации эта величина выбрана постоянной.

В контексте данной задачи моделирование случая без взаимодействия проводников приводит к уже полученным результатам, показанным на рис. 1 и 3 для идеальной и реальной линий соответственно.

При учете взаимных параметров R_{12}, L_{12}, C_{12} характер зависимостей для линий с потерями и без таковых идентичен случаю двухпроводной линии с потерями (рис. 3, а и б).

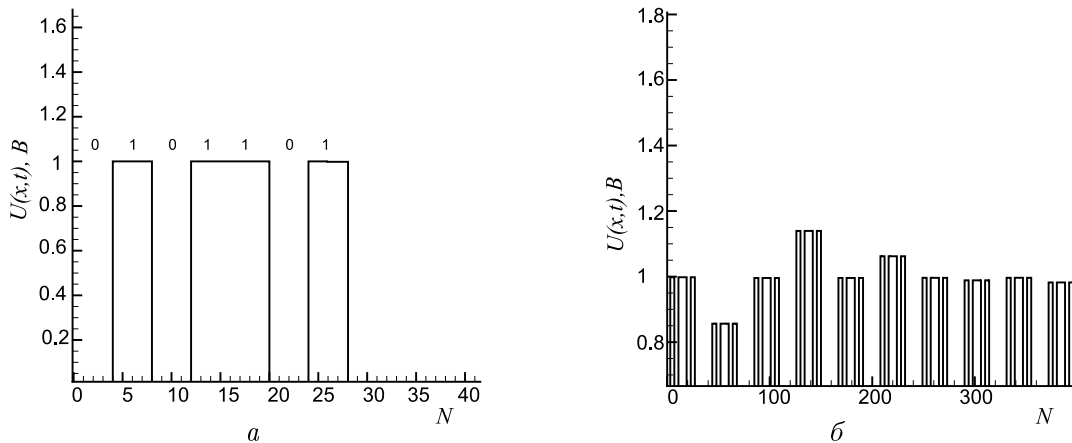


Рис. 4. Многопроводная линия связи: *a* — исходная последовательность цифровых импульсов; *б* — цифровая последовательность после десяти отражений.

Это связано с тем, что волновое сопротивление в обоих случаях имеет действительную составляющую за счет взаимодействия линий. Единственное условие, которое необходимо соблюдать, это сохранение соотношения между действительной составляющей волнового сопротивления и активной нагрузкой.

В качестве заключительного примера, иллюстрирующего универсальность изложенных методов, рассмотрим распространение последовательности цифровых импульсов. На рис. 4, *a* представлена исходная цифровая последовательность, а на рис. 4, *б* — развернутая во времени последовательность импульсов после десяти отражений. По оси X отложено число точек дискретизации, формирующих цифровые импульсы.

Из рис. 4, *б* видно, что если провести огибающую последовательности импульсов, то динамика отражений и амплитуд переходного процесса в точности совпадает с откликом для одиночного скачка напряжения (рис. 3, *б*) при условии соблюдения соотношения между вещественной частью волнового сопротивления и сопротивлением нагрузки. Отметим, что такое возможно только в случае отсутствия дисперсии и потерь.

Тестирование методов выявило их сильные и слабые стороны, которые, во-первых, связаны с особенностями анализа в частотной и временной областях, во-вторых, с особенностями собственной реализации. Так, в методе Годунова каноническая форма записи сильно зависит от постановки задачи. Напротив, метод Рунге — Кутты — Фельдберга вообще не требует преобразования исходной системы уравнений, которая может быть записана в общем виде для всех случаев. С другой стороны, метод Годунова может быть применен для решения нелинейных задач. Отметим, что метод Годунова широко используется для решения задач газовой динамики, однако примеры решения электродинамических задач авторам неизвестны.

Заключение

Проведено моделирование переходного процесса, вызванного единичным скачком напряжения и последовательностью цифровых импульсов. Получены картины переходных процессов в различных режимах работы линий связи. Рассмотрены различные режимы работы линий. Замечено, что во всех случаях амплитуда переходного процесса меньше, если сопротивление нагрузки больше действительной части волнового сопротивления линии.

Поскольку точного согласования волнового сопротивления линии и нагрузки в реальных линиях связи добиться весьма проблематично, необходимо стремиться к выполнению указанного условия. Таким образом, предлагаемый подход позволяет проводить расчет основных параметров линий связи и учитывать особенности распространения сигнала в линиях с нелинейными нагрузками на концах, что, в свою очередь, дает возможность рассматривать задачи подключения линий к реальным устройствам (сетевым картам, хабам, свитчам и другому сетевому оборудованию). Учитывая достоинства и недостатки обоих подходов, для получения наиболее полной картины явлений в кабельных системах в дальнейшей работе предполагается использовать эти методы совместно.

Список литературы

- [1] СЕМЕНОВ А.Б. Структурированные кабельные системы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Компьютер Пресс, 1999. 482 с.
- [2] ТАММ И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1989. 504 с.
- [3] ГАЗИЗОВ Т.Р. Совершенствование межсоединений монтажных плат: Дис. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР, 1998. 153 с.
- [4] ЛЕОНТЬЕВ Н.А. Анализ временного отклика в межсоединениях быстродействующих радиоэлектронных схем: Дис. ... канд. техн. наук. Томск: ТУСУР, 2000. 164 с.
- [5] МИТРОХИН В.Е., ПОЗДНЯКОВ Л.Г. Математическая модель влияния импульсного электромагнитного поля на систему линейных сооружений железнодорожного транспорта // Проблемы защиты систем передачи информации от электромагнитного влияния на железнодорожном транспорте: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. В.Е. Митрохина. Омск: Омский ин-т инж. ж.-д. транспорта, 1991.
- [6] ЧИСЛЕННОЕ решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.
- [7] ФОРСАЙТ Дж., МАЛЬКОЛЬМ М., МОУЛЕР К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980.
- [8] ШЕВЧУК А.А. Методы анализа целостности сигнала в структурированных кабельных системах: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГИЭМ, 2003. 117 с.
- [9] ЛЕВИНШТЕЙН М.Л. Операционное исчисление и его приложения к задачам электротехники. М.: Энергия, 1964.
- [10] КОНТОРОВИЧ М.И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях: Учеб. пособие для вузов. М.: Сов. радио, 1975. 320 с.
- [11] ЗЕВЕКЕ Г.В., ИОНКИН П.А. Основы теории цепей. М.; Л.: Госэнергоиздат., 1963.

Поступила в редакцию 20 февраля 2006 г.